

基于可靠性理论的包装振动试验方法改进

江春冬, 李海龙, 杜太行, 武玉维
(河北工业大学, 天津 300130)

摘要: **目的** 基于可靠性理论改进包装件的振动试验方法。 **方法** 通过界定产品平均寿命、试验截止时间和失效数,研究了样本大小对整个试验可靠程度的影响,以及改变包装阻尼与振动频率对试件振动幅值的影响。 **结果** 保证包装产品的可靠性有必要明确样本的大小,样本过小将不能完全体现该批产品的可靠程度;样本过大,虽然能充分体现该批产品的可靠程度,但试验费用将大大提高。随着产品样本的增大,使用者的风险降低。 **结论** 在包装件振动试验中融入可靠性理论,并在试验标准中加入失效率验证程序和失效率等级等内容,提高了包装件的可靠性。

关键词: 可靠性理论; 振动试验; 失效判据; 可靠性等级; 失效率

中图分类号: TP485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)05-0016-05

Improvement of Test Method for Vibration in Packaging Based on Reliability Theory

JIANG Chun-dong, LI Hai-long, DU Tai-hang, WU Yu-wei
(Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

ABSTRACT: To improve the test method for vibration of packaged products based on reliability theory. By defining the average product life expectancy, test end time and failure number, the paper investigated the effect of sample size on the entire test reliability, and the influence of change of the packaging damping and vibration frequency on the vibration amplitude of the specimen. It was necessary to determine the sample size in order to ensure the reliability of the packaged products. If the sample size was too small, the reliability of this batch of samples could not be fully reflected. If the sample size was too large, although the reliability of this batch of products could be fully reflected, the test cost would be largely increased. With the increase of product samples, the user's risk decreased. The reliability of the packaged products was increased by integration of reliability theory into the vibration test of packaged products as well as the introduction of failure rate verification procedure and failure rate level into the test standards.

KEY WORDS: reliability theory; vibration test; failure criteria; reliability level; failure rate

随着物流服务的快速发展,货物在运输过程中的安全性日益引起人们的重视。有报告显示,我国物流业每年因包装事故造成的损失约150亿元,因装卸、运输事故造成的损失约500亿元。对于一般货物,在运输过程中的损失可由相关企业承担,但对一些贵重货物或特殊货物,其运输过程中如果安全得不到保障,就可能涉及生命安全及环境污染等问题,这是企业难以承担的。在运输过程中,造成破坏最大的是振动因

素,因此,在批量生产前通过振动试验准确检查出货物的可靠性,将有助于减少特殊货物运输中企业及社会的经济损失^[1-2]。然而,传统的振动试验方法还存在诸多缺点与不足,包括没有对试件的样本大小作出具体规定^[3]、缺乏货物的失效判据^[4-5](试验标准中没有明确提出判为不合格的货物破损程度,以及货物已经破损的具体现象)、缺乏可靠性等级(对军工产品或者某些要求较高的工业用品至关重要)和破损的

收稿日期: 2014-08-02

基金项目: 河北省青年基金(F2014202264)

作者简介: 江春冬(1974—),女,吉林白城人,博士,河北工业大学讲师,主要研究方向为智能算法、计算机检测技术。

判定依据(仅根据经验确定,存在较大的主观随意性)。以往样本大小是由商家自己决定,做实验的产品个数比较随意,因而从可靠性的角度看,货物破损的概率偏大、偏小的可能性都存在。同时,货物类型很多,具体到低压电器、医疗器械,其失效实例的历史资料有限,样本大小的选取缺乏确定性的依据。为此,通过添加验证程序,在确立样本大小的同时,也对货物能否被接收做出具体规定。另外,通过严谨的数学推导,给出货物破损时波形变化的依据。

1 试验样本大小确定的必要性

失效率验证试验程序流程见图1。

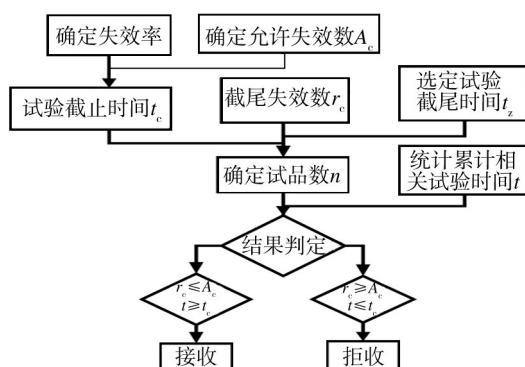


图1 失效率验证试验流程

Fig.1 Flowchart of failure rate validation test

失效率验证是可靠性理论中很重要的环节,失效率是在样本大小确定的前提下所进行的,样本大小的确定在整个验证流程中很重要。如果样本大小不合适,将导致失效率的验证失败,同时对此批货物是否会误判产生很大影响。下面将验证样本大小与货物误判的关系。

在质量抽样检查中,当批量 N 较大(即 $N > 10n$)时,1次抽样方案的接收概率^[7]为:

$$L(p) = \sum_{r=0}^{A_c} C_n^r p^r q^{n-r} \quad (1)$$

式中:对于可靠性抽样, A_c 为允许失效数; r 为样品在 t 时刻的失效数; p 为不可靠度 $F(t)$; q 为可靠度。

显然,可靠性抽样时1次抽样的接收方案是 $F(t)$ 的函数,故可用 $F(t)$ 表示:

$$L[F(t)] = \sum_{r=0}^{A_c} C_n^r F(t)^r [1 - F(t)]^{n-r} \quad (2)$$

式(2)为确定产品可靠性抽样方案的基本关系式。

由于威布尔分布^[8-9]具有3个参数,其适应能力

强,亦即对各种类型的实验数据拟合的能力强,因此,这里采用威布尔分布。在很多情况下,威布尔分布的位置参数 v 等于0,平均寿命抽样比可靠性抽样更常用,下面仅讨论位置参数 $v=0$ 时的平均寿命抽样。当 $v=0$ 时,特征寿命 η 与平均寿命 μ 及形状参数 m 间的关系为:

$$\eta = \mu / \Gamma(1 + \frac{1}{m}) \quad (3)$$

式中: $\Gamma(1 + \frac{1}{m}) = \int_0^{\infty} x^{1/m} e^{-x} dx$ 。将此式代入累

计失效分布函数 $F(t)=1-e^{-(t/\eta)^m}$ 可得:

$$F(t) = 1 - e^{-[\frac{t}{\mu} \Gamma(1 + \frac{1}{m})]^m} \quad (4)$$

当 $t=t_c$ (t_c 为试验截止时间)时,式(4)变为

$$F(t_c) = 1 - e^{-[\frac{t_c}{\mu} \Gamma(1 + \frac{1}{m})]^m}。$$

将式(4)代入到可靠性1次抽样的接收概率中,可得:

$$L[F(t_c)] = \sum_{r=0}^{A_c} C_n^r \{1 - e^{-[\frac{t_c}{\mu} \Gamma(1 + \frac{1}{m})]^m}\}^r \{1 - e^{-[\frac{t_c}{\mu} \Gamma(1 + \frac{1}{m})]^m}\}^{n-r} \quad (5)$$

由式(5)可见,在 m 一定时,接收概率 $L[F(t_c)]$ 是 μ 的函数,因此也可写成 $L(\mu)$,即

$$L(\mu) = \sum_{r=0}^{A_c} C_n^r \{1 - e^{-[\frac{t_c}{\mu} \Gamma(1 + \frac{1}{m})]^m}\}^r \{e^{-[\frac{t_c}{\mu} \Gamma(1 + \frac{1}{m})]^m}\}^{n-r} \quad (6)$$

由此可见,当 μ 增大时, $L(\mu)$ 也增大。

当 $\mu=\mu_1$ (批平均寿命容限)时仍有可能使本应判为不接收的产品被错误地判为合格而被接收,其误判的概率为 β 。

当 $\mu=\mu_1$ 时,将 $L(\mu_1)=\beta$ 代入式(6)可得:

$$\sum_{r=0}^{A_c} C_n^r \{1 - e^{-[\frac{t_c}{\mu_1} \Gamma(1 + \frac{1}{m})]^m}\}^r \{e^{-[\frac{t_c}{\mu_1} \Gamma(1 + \frac{1}{m})]^m}\}^{n-r} = \beta \quad (7)$$

当 $\mu=\mu_1$ 时判为不合格而拒收的概率 $1-\beta$ 越大时,该抽样方案可信的程度就越高,因此,常把 $1-\beta$ 作为抽样方案的置信度。

某产品在界定平均寿命 μ_1 、允许失效数 A_c 、试验截止时间 t_c 、威布尔分布的形状参数 m 时,得出的误判概率随样本大小变化的曲线见图2。

从图2可知,该试验的包装件要保证其误判的概率在0.1以下,包装件的数量至少有8个。不同的包装件限制条件不同,但是从判断包装件是否会被误判的角度,样本大小的重要性不言而喻。此外,选取样本大小时应考虑货物整体 N 的大小,以及产品价格、试验周期等因素,一般也可参照GB/T 2828《逐批检查计

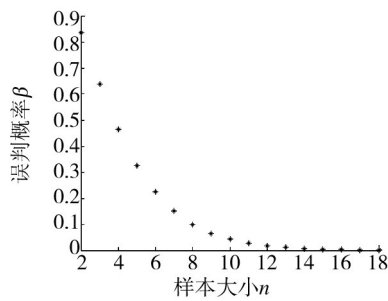


图2 误判概率与样本大小的关系

Fig.2 Probability of miscalculation vs. sample size

数抽样程序及抽样表》来确定。

2 包装物破损时对货物破损的判定

2.1 受迫振动的动力学方程^[10]

假定振动台为简谐力作用下的单自由度线性系统,那么,振动台可以由质量 m 、弹簧系数 k 和阻尼器阻尼系数 r 来模拟,并有: $m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - r \frac{dx}{dt} + F_0 \cos \omega t$ 。令 $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$, $2\beta = \frac{r}{m}$, $f_0 = \frac{F_0}{m}$, ω_0 为固有频率, β 为阻尼因数。有:

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t \quad (8)$$

式(8)为受迫振动的动力学方程形式,是二阶常系数线性非齐次微分方程。

2.2 受迫振动动力学方程的解

1) 方程的通解。设 $\beta < \omega$, 欠阻尼状态,则受迫振动动力学方程的通解为:

$$x_0(t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\sqrt{\omega^2 - \beta^2} t + \alpha) \quad (9)$$

式中: A_0 和 α 由初始条件确定。

2) 方程的特解。

$$x_1(t) = A_1 \cos(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

式中: A_1, φ 由初始条件确定。

3) 非齐次方程组的解。

$$\begin{cases} x(t) = x_0(t) + x_1(t) \\ x(t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega' t + \alpha) + A_1 \cos(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (11)$$

下面确定 A_1 和 φ :

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -A_1 \omega \sin(\omega t + \varphi) = \omega A_1 \cos(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) \\ \ddot{x}_1(t) = -A_1 \omega^2 \cos(\omega t + \varphi) = \omega^2 A_1 \cos(\omega t + \varphi + \pi) \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入非齐次方程得:

$$-A_1 \omega^2 \cos(\omega t + \varphi) - 2\beta \omega A_1 \sin(\omega t + \varphi) + A_1 \omega_0^2 \cos(\omega t + \varphi) = f_0 \cos \omega t \quad (13)$$

利用和差化积公式得:

$$\begin{cases} -\omega^2 A_1 \cos \varphi - 2\beta \omega A_1 \sin \varphi + A_1 \omega_0^2 \cos \varphi = f_0 \\ \omega^2 A_1 \sin \varphi - 2\beta \omega A_1 \cos \varphi + A_1 \omega_0^2 \sin \varphi = 0 \end{cases}$$

推导公式可得:

$$\tan \varphi = \frac{-2\beta \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

$$A_1 = f_0 / \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2} \quad (14)$$

可见,受迫振动方程式(8)的解式(11)由2项之和组成。第1项表示阻尼振动随着时间的增加而趋于0,第2项是简谐振动,振幅为 A_1 ,频率为 ω 。随着时间的增加,第1项的阻尼振动可以忽略不计,质点的振动由第2项决定,且其频率与驱动力的频率相同,而不是简谐振动。

由(14)式可知受迫振动振幅随驱动力频率的变化情况:对于一定振动系统,在阻尼一定的条件下,最初振幅随驱动力频率 ω 的增加而增加,达到最大后,又随驱动力频率的增加而减小,最后驱动力达到很高频率,而质点几乎不动。

振动系统受迫振动时,振幅达到极大值,且共振时驱动力的圆频率为 $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$ 。

由此可知,位移共振频率不等于系统的固有频率 ω_0 ,仅当阻尼无限小时,共振频率无限接近于固有频率。

2.3 共振频率的变化

振动系统受迫振动时,振幅达到极大值,包装出现破损时, m, k 及 r 与共振频率的变化关系为:

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \quad (15)$$

对式(15),对 k 求导数:

$$d\omega_r = \frac{1}{2m \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}} dk$$

$$\left| \frac{d\omega_r}{\omega_r} \right| > \frac{k}{2m\omega_0^2} \left| \frac{dk}{k} \right| = 0.5 \left| \frac{dk}{k} \right|$$

当货物破损时, m 不发生变化,而 k 发生变化。也就是说,当 k 变化10%时,共振频率最小变化为5%。

将 $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$ 代入 $2\beta = \frac{r}{m}$ 可得:

$$\left| \frac{d\omega_r}{\omega_r} \right| = \frac{\beta \gamma}{m(2\beta^2 - \omega_0^2)} \left| \frac{dr}{r} \right| > \frac{\beta \gamma}{2\beta^2 m} \left| \frac{dr}{r} \right| = 0.5 \left| \frac{dr}{r} \right|$$

当外包装出现损坏, r 变化10%时,共振频率最小

变化5%。

2.4 共振幅值的变化

将 $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$ 代入 $A_1 = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}$

得到:

$$A_1 = \frac{f_0}{2\beta \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$$
$$\left| \frac{dA_1}{A_1} \right| = - \frac{k}{2m(\omega_0^2 - \beta^2)} \left| \frac{dk}{k} \right| > 0.5 \left| \frac{dk}{k} \right|$$

当 k 变化10%时,共振幅值最小变化5%。振动幅值及频率变化见图3。

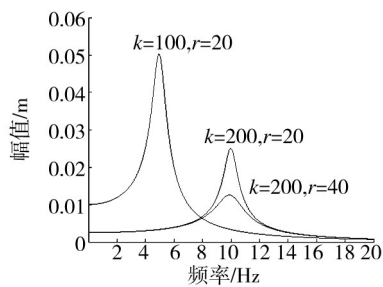


图3 振动幅值与频率的关系
Fig.3 Vibration amplitudes vs. frequencies

由图3可知,当货物发生破损时,质量不会发生明显的变化,但当 k 变化即频率发生变化时,幅值也发生相应的变化。当外包装出现破损时,阻尼 r 发生变化,共振幅值同样发生明显变化。

3 货物失效判据

货物失效判定在试验过程和试验后的检测项目中进行,将失效判据加入试验标准中。

在操作可靠性试验过程中,当出现下列任意一种情况时,即认为该产品失效。

- 1) 在试验检测过程中,外包装没有出现破损的情况下,波形出现较大幅度的变化,且不能恢复到接近理论波形。
- 2) 在试验检测过程中,外包装没有出现破损的情况下,3~100 Hz与100~3 Hz扫描的整个过程波形差异明显。
- 3) 试验结束后,产品的各构件产生变形、弯曲裂纹、断裂以及疲劳损坏等。
- 4) 试验结束后,产品的连接件松动、焊点脱焊、螺丝松动、印刷板插脚接触不良等。
- 5) 试验结束后测试,产品在振动的影响下系统造

成不稳定,有些系统甚至不能工作。
产品在操作可靠性试验后应进行外观检测,其中任一项的检测结果不符合产品标准的规定,即认为该产品失效。

4 失效率等级

可靠性指标包括两方面的含义:确立可靠性保证要求;确立可靠性的量化值。就“确立可靠性保证要求”而言,是军用标准或规范共同的内容,而“确立可靠性的量化值”则是失效率等级表征可靠性保证要求的元件规范特有的内容。

失效率等级^[11-12]按最大失效率 λ_{max} 的数值,将操作失效率划分为5个等级,失效率等级的名称和最大失效率见表1。失效率等级由制造厂自行确定。

表1 失效率等级
Tab.1 Failure rate level

失效率等级 名称	失效率等级代号 (GJB 264—996)	最大失效 (1/h或1/10次)
亚五级	L	3×10^{-5}
五级	M	10^{-5}
六级	P	10^{-6}
七级	R	10^{-7}
八级	S	10^{-8}

5 试验台改进方案

针对试验周期较长,振动过程中不能及时发现货物是否破损的问题,在试件包装内部加入图像采集设备。以液压振动台为例,见图4。

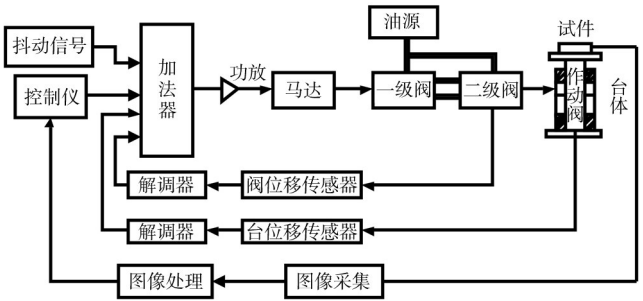


图4 改进振动台设计
Fig.4 The improved design of the vibration table

如果在试验过程中能采集比较清晰的图像,则可以采取图像处理^[13-14]方法判断试件是否破损(或裂痕)。在采集到清晰图像的情形下所进行的图像处理

见图5。

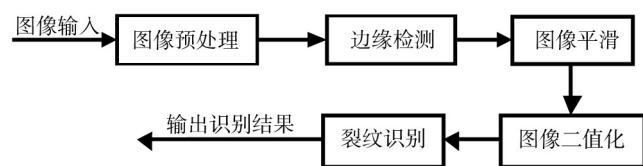


图5 图像处理流程

Fig.5 Flowchart of image processing

6 结语

通过研究,确定了失效率程序,明确了样本大小,能够减少货物因自身的特殊性与实验过程中的偶然性所导致的合格产品被拒收,或者不合格产品被接收的可能性。通过试验参数的仿真可知, k 与 r 的变化均会影响共振幅值,只有在某一因素确定、另一因素出现变化时,才能断定试件破损。在原有的试验标准中加入可靠性等级与失效率等级,使得产品质量有保障且能按等级分类,特别是军工产品。

参考文献:

- [1] 刘道标,宦海洋. 振动试验方法的研究及发展趋势[J]. 环境技术, 2006(3): 21—25.
LIU Dao-biao, HUAN Hai-xiang. A Study of the Methods of Vibration Tests and Growing Trend[J]. Environment Technology, 2006(3): 21—25.
- [2] 张巧寿. 振动试验系统现状与发展[J]. 航天技术与民品, 2000(8): 36—39.
ZHANG Qiao-shou. The Current Situation and Development of Vibration Tests[J]. Space Technology and Civilian Goods, 2000(8): 36—39.
- [3] GB/T 4857.10—2005, 包装运输包装件基本试验正弦变频振动试验方法[S].
GB/T 4857.10—2005, Packaging Basic Tests for Transport Package, Sinusoidal Vibration Test Method Using at Variable Vibration Frequency[S].
- [4] 廖华林,管志川,闫振来,等. 基于可靠性理论的套管失效风险评价方法[J]. 石油学报, 2010(1): 161—164.
LIAO Hua-lin, GUAN Zhi-chuan, YAN Zhen-lai, et al. The Evaluated Methods of Casing Failure Risk Based on Reliability [J]. Journal of Oil, 2010(1): 161—164.
- [5] 谢里阳,王正. 机械产品失效率预测的数学模型[J]. 失效分析与预防, 2007(4): 1—5.
XIE Li-yang, WANG Zheng. The Mathematical Model of Mechanical Products With Failure Rate Prediction[J]. Failure Analysis and Prevention, 2007(4): 1—5.
- [6] 贺国芳. 可靠性数据的收集与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995
HE Guo-fang. The Collection and Analysis Based on Reliability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995
- [7] 张英芝,申桂香,贾亚洲,等. 数控车床故障分布规律及可靠性[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 156—159.
ZHANG Ying-zhi, SHEN Gui-xiang, JIA Ya-zhou, et al. The Fault Distribution and Reliability of Numerical Control Lathe [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 156—159.
- [8] 陈殿生,王田苗,魏洪兴. 数控车床故障分布的两重威布尔分段模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(7): 766—769.
CHEN Dian-sheng, WANG Tian-miao, WEI Hong-xing. The Two Piecewise Model of Weibull in the Fault Distribution of Numerical Control Lathe[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(7): 766—769.
- [9] 李凌,徐伟. 威布尔产品加速寿命试验的可靠性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2010(7): 1544—1548.
LI Ling, XU Wei. The Reliability Analysis of Accelerated Life Tests With Product in Weibull[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010(7): 1544—1548.
- [10] 何国伟. 可靠性实验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999
HE Guo-wei. The Reliability Experiment Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999
- [11] 田锡进. 国外元器件质量可靠性等级的比较和分析[J]. 质量与可靠性, 1990(5): 22—27.
TIAN Xi-jin. The Comparison and Analysis of the Level of Foreign Components Quality Reliability[J]. Quality and Reliability, 1990(5): 22—27.
- [12] 肖虹,田宇,蔡少英,等. 国外军用电子元器件可靠性技术研究进展[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2005(S1): 184—188.
XIAO Hong, TIAN Yu, CAI Shao-ying, et al. R & D of Foreign Military Component on Reliability[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Test, 2005(S1): 184—188.
- [13] 赵军,赵继红,张雷. 焊缝结构光图像处理与特征提取方法[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(1): 114—119.
ZHAO Jun, ZHAO Ji-hong, ZHANG Lei. The Image Processing and Feature Extraction Method of Weld Structure of Optical[J]. Journal of Xi'an Jiao-tong University, 2013, 47(1): 114—119.
- [14] 胡少兴,马成林. 采用运动图像处理检测排种器充填性能[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 56—59.
HU Shao-lin, MA Cheng-lin. Detection of Motion Image Processing Seed Filling Performance[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2000, 16(5): 56—59.